渫水河砷污染环境中浮游动物的群落特征研究

郑金秀[1],周连凤[1],胡菊香[1],汪红军[1],彭 祺[2]

(1.水利部中国科学院水工程生态研究所,水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室,武汉 430079;
2.湖北省环境科学研究院,武汉 430072)

摘要: 受高砷背景的影响,渫水河及其支流存在不同程度的砷污染,为揭示砷污染的生态效应,探寻防治对策,研究了该水域中浮游动物的种群分布和季节变化,分析其密度与砷含量及TN、TP的关系。2006-2007年共进行3次调查,设置8个采样断面;共检出浮游动物166种,其中,原生动物(95种)>轮虫(55种)>桡足类(10种)>枝角类(6种);丰水期有104种,远大于平水期和枯水期。浮游动物现存量以丰水期最高,其次是平水期,枯水期最少;空间分布上以断面Ⅱ最高,黄水河支流高于渫水河干流,而渫水干流中段的现存量最小。种类组成上,由于桡足类和枝角类对重金属污染较为敏感,检出种类极少,且均是耐污型,轮虫则以α-β型种类为主,纤毛虫比例不高,只在断面Ⅱ和断面Ⅳ超过肉足虫比例。渫水河的Shannon-Wiener多样性指数、Simpson物种多样性指数、Margalef物种丰富度指数和Pielou均匀度指数值均<2。生物多样性指数与As含量不相关($r=0.674$),但轮虫密度与As含量显著相关($r=0.931$)。浮游动物密度与TN显著相关($r=0.826$),TN对渫水河的浮游动物群落组成起着关键作用,而As只对轮虫的生物量影响较大,并不能决定整个浮游动物的群落结构。

关键词: 浮游动物;群落特征;渫水河;砷

中图分类号: Q142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2012)06-0056-06

渫水河为澧水的第二大支流,发源于湖北五峰县境内东南部边陲,于湖南省石门县城关汇入澧水,干流长171 km。渫水的支流黄水河是高砷背景地区,石门雄黄(As_4S_4)矿藏距离渫水仅7 km。石门雄磺开采已有1 500多年的历史,该地区矿业生产较活跃,长期的开采及以前不当的废气、废水、废渣处理方式对黄水河造成了严重污染。黄水河注入渫水后,使水体砷含量严重超标,对渫水及澧水也造成了污染,直接危及周围居民的身体健康(庄金陵,2003)。不同的生态环境孕育着相应的生物群落(董哲仁,2003)。浮游动物作为水生生物的重要组成部分,不仅是衡量水生态系统稳定的主要因素,其中某些种类还是重要的水质监测指示种。由于水体的氮磷营养与浮游生物关系密切,其营养水平往往与浮游动物的种类、数量等有一定的相关性(杨桂军,2005),因此浮游动物已被逐步应用于水质评价和水生态健康评价(Dia et al,1998;Reynolds,2003;汪飞等,2007;吴利等,2011;曾阳等,2012;沈强等,2012);此外,浮游动物世代周期短,有些种类对污染物(如重金属)反应敏感,具有很好的指示作用(牛世全等,2002),而重金属的毒性将受到水体理化因子的影响(Sarma et al,2005)。本文通过对渫水河浮游动物的3次调查,测定水质和砷含量,研究在砷污染水体中浮游动物的群落组成及季节变化,分析浮游动物与水环境因子和砷含量的相关性,以期为揭示渫水河砷污染的生态效应、监控砷污染发展、探寻其污染治理方法等提供理论依据。

1 调查方法

1.1 采样时间和监测断面

按季节与河流情况划分枯水期、平水期和丰水期,2006-2007年在各期分别进行了现场调查和采样工作。由于渫水河流域为高山峡谷地貌,受地理条件限制,从上游支流汇入点至下游城镇之间只在中间位置设了1个采样点。断面Ⅰ距雄黄化工厂上游5~10 km,为背景断面,即不受工厂生产影响的区域;断面Ⅱ为控制断面,即高含量砷的黄水河流入渫水前的基础值;断面Ⅲ~Ⅷ均为监测断面,断面Ⅲ为不受黄水河影响的渫水及饮水水源地,断面Ⅳ为黄水河汇入渫水下游1 km处,断面Ⅴ位于渫水的支流仙阳河,断面Ⅵ为黄水河汇入渫水后下游约30 km处,断面Ⅶ为黄水河汇入渫水后下游约60 km处,断面Ⅷ在水工构筑物附近,靠近城镇。监测采样点的布设如图1。

收稿日期: 2012-09-17

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201001080,200901055-03);国家自然基金(51279112)。

作者简介: 郑金秀,1979年生,女,助理研究员,研究方向为水生态监测与保护。E-mail:surexxzh@126.com

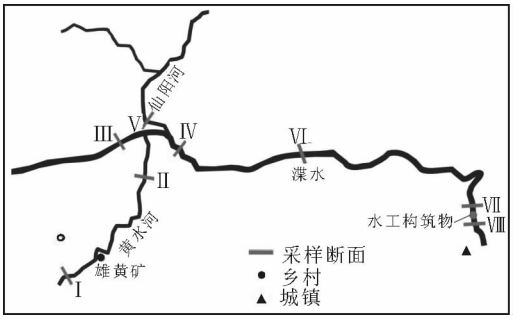

图 1　采样断面

Fig. 1　Sampling sections

1.2　调查内容与方法

1.2.1　*浮游动物采集和处理*　浮游动物采集定性和定量样品。轮虫、原生动物定性用 25 号筛绢网采集,4% 甲醛固定,定量采 2 L 水样后加鲁哥氏液沉淀 48 h,浓缩至 30 mL;浮游甲壳动物定性标本用 13 号筛绢网采集,定量标本用容量 2.5 L 的水生 81 型采水器采集,再用 25 号筛绢网过滤,标本均用 4% 甲醛固定。

1.2.2　*水体理化指标及砷含量测定*　用 YSI 多参数水质分析仪测定水温、pH、溶解氧(DO)、电导率(Ec)等常规水质参数,按照《中华人民共和国地表水环境质量标准》中的分析方法测定总氮(TN)、总磷(TP)、总有机碳(TOC)等水化学指标。用氢化物－原子荧光光度法测定水体的总砷含量。

1.3　数据处理

浮游动物 Shannon-Wiener 生物多样性指数:$H' = -\Sigma(N_i/N)\ln(N_i/N)$,Simpson 物种多样性指数:$D = 1 - \Sigma(N_i/N)^2$,Margalef 物种丰富度指数:$d = (S-1)/\ln N$,Pielou 物种均匀度指数:$E = H/\ln S$。按 E/O = E(富营养型指示种数)/O(贫营养型指示种数)计算 E/O 指数(陈立婧,2008)。用 SPSS 分析浮游动物平均密度及物种多样性与 As 含量和 N、P 营养盐的相关性。

2　结果

2.1　水环境质量

各监测断面水温范围为 9.6 ~ 29.1℃,平均水温 17.7℃。电导率范围为 187 ~ 780 μS/cm,平均值为 439 μS/cm,枯水期高于丰水期。支流黄水河水质受工农业生产影响较多,监测断面 N、P 较高,而渫水干流断面Ⅲ及仙阳河支流水质尚好。枯水期干流断面水质可以达到地表水 III 类标准,丰水期除断面Ⅲ和断面Ⅳ外,其余断面 TN 和 TP 超过 III 类标准。

水体中 As 含量以雄黄矿下游断面Ⅱ最高,达 21.15 mg/L,其次是黄水河与渫水的交汇口下游断面Ⅴ,平均含量 0.49 mg/L。以我国地表水环境质量标准(GB3838-2002)中Ⅲ类水标准(总砷含量≤0.05 mg/L)评价各监测断面不同时期的砷超标率,枯水期断面Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ砷含量较低,低于地表水Ⅲ类标准,丰水期全部超标,而断面Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ的砷超标率分别达 100%、100%、100%、66.7% 和 66.7%。各断面平均水体理化指标和总 As 含量见图 2。

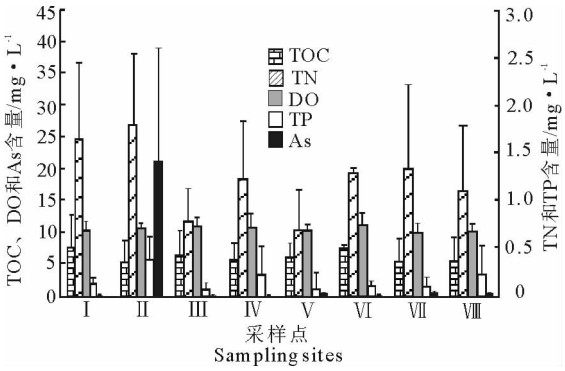

图 2　水体平均理化指标及总砷含量

Fig. 2　The average physicochemical indexes and total As content

2.2　浮游动物的种类组成

2006 – 2007 年采样共检出浮游动物 166 种,其中,原生动物 95 种,轮虫 55 种,桡足类 10 种,枝角类 6 种。各季节浮游动物的种类数变化较大,丰水期检出种类 104 种,远大于其它季节;枯水期为 73 种,稍多于平水期的 65 种。从图 3 浮游动物的分布情况可以看出,丰水期增加的种类主要在Ⅰ、Ⅱ、Ⅶ、Ⅷ断面。在组成上,原生动物的肉足虫和纤毛虫种数相当,分别为 48 和 47 种,其中珊瑚囊变形虫(*Saccamoeba gongornia*)、球砂壳虫(*Dirrlugia globulosa*)、膜袋虫(*Cyclidium* sp.)出现频率最高,在每个

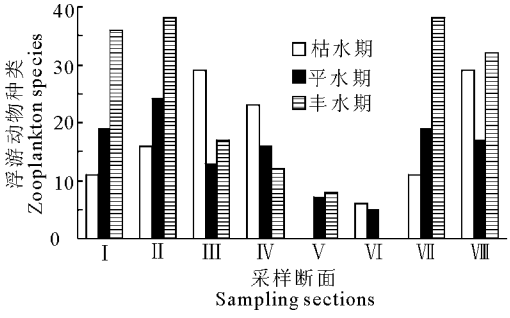

图 3　各断面浮游动物的种类分布

Fig. 3　Distributions of zooplankton species in every section

断面都能检出。轮虫的种类组成上以腔轮科的居多,但疣毛轮科的疣毛轮虫(*Synchaeta* sp.)检出率最高,达到87.5%,其次是狭甲轮科的盘状鞍甲轮虫(*Lepadella patella*)和锥轮科的小链巨头轮虫(*Cephalodella catellina*),为75%。采集到的枝角类多为盘肠溞(*Chydorus* sp.),桡足类则以真剑水蚤(*Eucyclops* sp.)和近剑水蚤(*Tropocyclops* sp.)居多。

2.3 浮游动物现存量

总体来说,浮游动物现存量丰水期>平水期>枯水期。枯水期浮游动物现存量在0~1830.1个/L,平均726.0个/L;平水期为157.5~1410.0个/L,平均为600.0个/L;丰水期为172.5~1860.1个/L,平均为849.7个/L。断面Ⅵ因涨水淹没了采样点,未能采集到样本,故以扣除该点计。从图4浮游动物现存量的空间分布来看,以断面Ⅱ的现存量最高,黄水河支流的现存量要高于渫水河干流,而渫水干流的中段现存量最小。

2.4 浮游动物污染种类

3次调查采集到的浮游甲壳动物以耐污型种类为主,如裸腹溞、盘肠溞、拟剑水蚤等。原生动物可通过计算各断面纤毛虫的比例来反映生态系统营养状况的分布。轮虫则按污染等级分成α型(寡污型)、α-β型(寡污至β中污型)、β型、β-α型(β中污型至α中污型)和α型,计算各级污染种类的比例及E/O值,结果如表1。

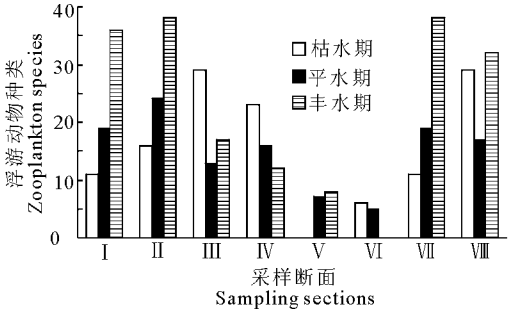

图4 浮游动物现存量的空间分布

Fig.4 Spatial distributions of Zooplankton biomass

表1 轮虫污染种类指数及纤毛虫比例

Tab.1 Rotifer pollution species index and ciliate ratios

浮游动物	污染等级	采样断面							
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ
轮虫	α	0.38	0.22	0.25	0.30	1.00	0.33		0.13
	α-β	0.25	0.44	0.42	0.40		0.67	0.50	0.63
	β	0.13	0.33	0.17	0.20			0.33	0.25
	β-α	0.25		0.08				0.17	
	α			0.08					
	E/O	1.00	1.17	1.12	0.86	0.00	0.67	2.00	1.17
原生动物	纤毛虫比例/%	48.5	61.8	25.0	62.5	30.0	33.3	19.4	36.8

2.5 生物多样性分布

各断面的生物多样性指数计算结果如图5。

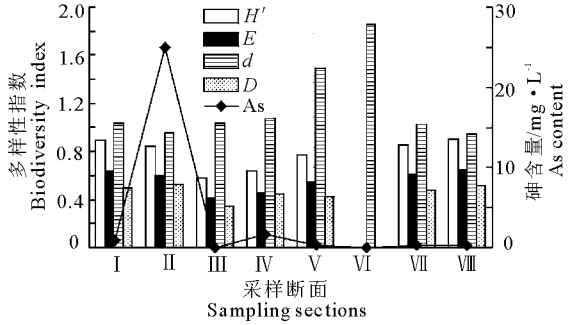

图5 各断面的生物多样性指数及砷平均含量

Fig.5 Biodiversity index and average As content in every section

Shannon-Wiener指数、Simpson指数和Pielou均匀度指数的变化趋势一致,以支流黄水河的断面Ⅰ、Ⅱ及渫水下游断面Ⅶ、Ⅷ的物种丰富度和均匀度最高,其次是支流仙阳河的断面Ⅴ,而不受黄水河影响的渫水河上游断面Ⅲ则最小。物种丰富度指数则在渫水河干流中段出现最高值,支流黄水河和渫水河下游断面较小。

3 讨论

3.1 浮游动物群落结构与污染程度关系

不同的环境条件都将导致浮游动物种类组成的不同,渫水河与其他河流最大的不同之处在于其水体环境不仅要考虑是N、P营养物质的多寡,还应考虑As的毒害作用。3次调查采集到的浮游甲壳动物很少,不论是水量较小的支流区还是渫水下游,或是有较明显河流状态的区域,浮游甲壳动物均不常见,因此该河流的水力停留时间并不是影响浮游甲壳动物种类组成的关键因素。从生物的生态学特征来看,所检出种类几乎都是耐污型种类;从个体上看幼体较多,可见砷污染抑制了浮游甲壳动物的生长,使其向小个体和耐污型方向发展。由于轮虫和原生

动物对污染的耐受性较强,在各断面均有检出,且在 As 含量最高的断面Ⅱ检出的种类及生物量均较高。

从表 1 可以看出,轮虫以 α-β 型种类为主,除了断面Ⅰ、Ⅲ和Ⅶ出现 β-α 及少数 α 型种类外,其余断面皆只有寡污至 β 中污带的种类,说明渫水河除了 As 污染较严重外,并没有其它营养盐污染。从 E/O 值分布来看,最高为断面Ⅶ,其次是断面Ⅱ和断面Ⅷ。纤毛虫原生动物可作为水生态系统健康的指示物(马克明,2001),渫水河纤毛虫比例以断面Ⅱ和断面Ⅳ最多,断面Ⅶ反而最少。可见不同的浮游动物在对污染程度的反映上表现出的信息是有差异的,这和生物体自身的特征和生物之间的相互关系密切相关,因为污染种类的划分本身就带有不确定性,有些广布性种类既可在富营养水域生长,也能在寡营养水域生长,而生物之间的竞争捕食关系也会影响生物的分布;如以滤食为主的枝角类就会对同样是滤食性的轮虫产生抑制作用,即具有相似生态位的 2 种生物之间必然存在竞争关系(孟东平,2006);同样,为避免被捕食,原生动物也会减少在捕食者过多的地方出现。轮虫 E/O 值与原生动物纤毛虫之间的相关系数为 -0.161,说明渫水河并不很丰富的营养物质使这 2 种生物产生了种间作用。

3.2　多样性指数与污染的关系

现在一般用多样性指数来反映生物群落结构中数量、种类组成变化的信息及水体污染程度,并认为多样性指数随富营养化程度的加深而降低(钱方平等,2007),并提出 $H' > 3$ 为轻污染或无污染,3 ~ 2 为 β 中污,2 ~ 1 为 α 中污, <1 为严重污染(温新利等,2006)。本次研究计算出的渫水河生物多样性指数均 <1,但参照水质指标,除黄水河支流的 TN、TP 超过 III 类标准外,干流和仙阳河支流的水质尚好。可见多样性指数与水体营养类型之间关系并不稳定,影响生物多样性的因素很多,既包括非生物因子也包括生物因子,甚至在富营养化地区多样性指数反而更高,本研究亦类似。断面Ⅰ、Ⅱ位于支流黄水河,水量较小,水流平缓,并有人类活动和工矿业,断面 VII、Ⅷ则靠近城镇,人类活动频繁,这 2 个区域的外来营养物质相对于其它断面更高,物种也较丰富,其多样性指数也高于其它断面。可见采用多样性指数反映生物种群数量和结构特征是有参考意义的,但用于指示水体的污染程度则存在局限性,尤其是存在河流状态的水体,其影响生物群落构成的因素更为复杂,应综合考虑加以判断。

3.3　浮游动物密度与 As 含量及营养盐的关系

用 SPSS 计算 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数,Pielou 均匀度、平均密度与平均 As 含量的相关性,其相关系数分别为 -0.25、0.187、-0.255 和 0.686,说明河流中 As 含量虽然很高,但不足以对浮游动物的整个种群结构产生关键性影响。若考虑枝角类和桡足类检出数太小容易产生误差,而单独计算轮虫和原生动物密度与 As 的相关性时,则发现轮虫密度与 As 含量显著相关,相关系数达到 0.931,但原生动物与 As 的相关性不显著(表 2)。

重金属对水生生物的毒性受环境中物理、化学和生物因素的影响,如酸碱度、温度、离子浓度以及与无机和有机试剂的络合作用,包括生物体的种类、大小、生长期、耐受性等(张才学,2005)。As 在水体中的形态转化是个复杂过程,砷容易发生水流迁移,从水体中砷分布的季节变化可以很明显看出这一点。砷的沉积迁移是从水体析出转移到底质中,且主要沉积在表层(姚刚,2006)。因此,砷在水体中的含量远比其背景值和矿区周围低。适量的重金属对生物体往往有刺激作用(Bardgett, 1994),这种刺激作用可能是促进轮虫繁殖的一个因素。

砷一方面受氧化还原环境的影响,被吸附到粘土颗粒及共沉淀到金属离子的沉淀物上,另一方面还受水中生物的氧化还原作用,由细菌或浮游生物将砷氧化为砷酸盐或还原为砷化物(杨胜科,

表 2　浮游动物密度与砷含量及氮、磷的相关性

Tab. 2　Correlations between zooplankton densities and As content, N, and P

指标	As	平均密度	轮虫密度	原生动物密度	TN	TP
As	1					
平均密度	0.686	1				
轮虫密度	0.931**	0.891**	1			
原生动物密度	0.674	1.000**	0.883**	1		
TN	0.614	0.826*	0.804*	0.824*	1	
TP	0.349	0.282	0.282	0.281	0.236	1

注:** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

Note: ** Significant correlation at 0.01 level (double side), * Significant correlation at 0.05 level (double side).

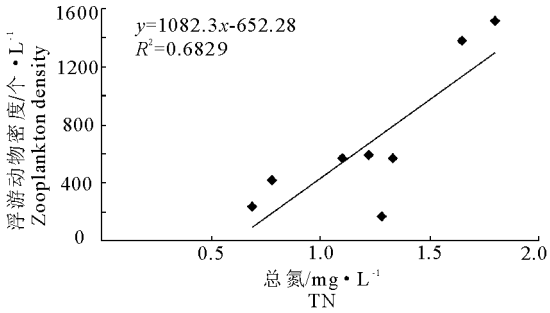

图6 浮游动物密度与总氮的关系

Fig. 6 Relationship between Zooplankton density and TN

2004)。不同形态的 As 对生物体的毒性及作用途径也不同,关于渫水轮虫与 As 的关系还有待从 As 的不同形态上的作用作进一步研究。

营养盐作为浮游动物的外界生存环境,与浮游动物总是发生着潜在的互动关系。水体中营养盐的增加,使得浮游动物的群落结构由大型浮游动物占优势转变为小型浮游动物占优势,而浮游动物的总密度和生物量与营养盐状态相关,小型浮游动物(如纤毛虫、轮虫)比大型浮游动物(枝角类、桡足类)表现的相关性更为明显(Bays & Crisman, 1983)。

本研究中,通过计算发现浮游动物平均密度、轮虫密度和原生动物密度都与 TN 显著相关,与 TP 不相关(表2)。可见渫水河的 N 元素对浮游动物的密度起着主导作用。对 TN 和浮游动物密度进行线性回归,得 $y = 1082.3x - 652.28$, $R^2 = 0.6829$(图6)。结合水质状况可知,渫水的营养程度为贫营养,浮游动物主要受食物密度的制约,则总氮含量较高时,大量浮游植物迅速繁殖,为浮游动物提供了充足的饵料。因此,浮游动物的生物量和密度均较高。

参考文献

Sarma S S S, Hilda Fabiola NU, NEZ-CRUZ1, et al. 2005. 在培养基和食料中添加铅和镉对轮虫种群动态的影响[J]. 动物学报, 51(1): 46 – 52.

陈立婧, 顾静, 彭自然, 等. 2008. 漏湖轮虫群落结构与水质生态学评价[J]. 动物学杂志, 43(3): 7 – 16.

董哲仁. 2003. 河流形态多样性与生物群落多样性[J]. 水利学报, (11): 1 – 6.

马克明, 孔红梅, 关文彬, 等. 2001. 生态系统健康评价: 方法与方向[J]. 生态学报, 21(12): 2106 – 2116.

孟东平, 王翠红, 辛晓芸, 等. 2006. 汾河太原段水体浮游藻类生态位的研究[J]. 环境科学与技术, 29(10): 95 – 99.

牛世全, 宁应之, 马正学, 等. 2002. 重金属复合污染土壤中原生动物的群落特征[J]. 甘肃科学学报, 14(3): 44 – 51.

钱方平, 席贻龙, 温新利, 等. 2007. 湖泊富营养化对轮虫群落结构及物种多样性的影响[J]. 生物多样性, 15 (4): 344 – 355.

沈强, 俞建军, 陈晖, 等. 2012. 浮游生物完整性指数在浙江水源地水质评价中的应用[J]. 水生态学杂志, 33(2): 26 – 31.

汪飞, 吴德意, 王灶生, 等. 2007. 以浮游生物为指示生物的苏州河生态安全评价[J]. 环境科学与技术, 30(3): 50 – 53.

温新利, 席贻龙, 张雷. 2006. 芜湖市镜湖轮虫群落结构分析及水质的生态学评价[J]. 水生生物学报, 30(2): 152 – 158.

吴利, 冯伟松, 张堂林, 等. 2011. 春、秋季武湖浮游动物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志, 32 (2): 31 – 38.

杨桂军. 2005. 太湖三个湖区浮游动物群落结构周年变化的比较研究[D]. 武汉: 华中农业大学.

杨胜科, 王文科, 张威, 等. 2004. 砷污染生态效应及水土体系中砷的治理对策研究[J]. 地球科学与环境学报, 26 (3): 69 – 73.

姚刚. 2006. 鄱阳湖水生生物中痕量元素砷硒汞的环境和生物效应研究[D]. 成都: 成都理工大学.

曾阳, 苗明升, 付秀娥, 等. 2012. 温榆河浮游动物多样性及水质改善效果评价[J]. 环境科学与技术, 35(3): 200 – 205.

张才学, 郑文凯, 林玉凤, 等. 2005. 4 种重金属离子及其混合液对壶状臂尾轮虫的急性毒性试验[J]. 湛江海洋大学学报, 25(1): 56 – 59.

庄金陵. 2003. 砷对世界地下水源的污染[J]. 矿产与地质, 17 (2): 177 – 178.

Bardgett R D, Speir T W, Ross D J, et al. 1994. Impact of pasture contamination by copper, chromium, and arsenic timber preservative on soil microbial properties and nematodes [J]. Biology and Fertility of Soils, 18: 71 – 79.

Bays J S, Crisman, T L. 1983. Zooplankton and trophic State relationships in Florida lakes[J]. Can J Fish Aquat Sci, 40: 1813 – 1819.

Dia Z-pardo E, Vazquez G, Lopez-L6pez E. 1998. The phytoplankton community as a bioindieator of health conditions of Atezcal Lake, Mexieo[J]. Aquatic Eeosystem Health and Management, 160(3) : 191 – 203.

Reynolds C S. 2003. Planktic community assembly in flowing water and the ecosystem health of rivers[J]. Eeologieal Modelling, 160: 191 – 203.

(责任编辑 万月华)

Characteristics of Zooplankton Community in Arsenic Polluted Water of Xieshui River

ZHENG Jin-xiu[1], ZHOU Lian-feng[1], HU Ju-xiang[1], WANG Hong-jun[1], PENG Qi[2]

(1. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences. Wuhan 430079, P. R. China;
2. Hubei Environment Science Research Academy, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: Xieshui River and its tributaries have different levels of arsenic pollution. To reveal the ecological effects of arsenic pollution and explore prevention measure, distribution and seasonal change of zooplankton species in Xieshui River and its tributaries were investigated in this study, meanwhile, relationships between zooplankton density and arsenic contents, TN, and TP were estimated. Three surveys were carried out and 8 sampling sections were set during 2006 – 2007. 166 species of zooplankton were found, among which, protozoa (95 species) > rotifers (55 species) > copepods (10 species) > cladoceras (6 species), and 104 species were found in rainy season, much more than that in other seasons. The zooplankton biomass in rainy season is the largest, and the least in dry season. As to the spatial distribution, zooplankton biomass in section Ⅱ was more than those of the other sections, and zooplankton biomass in Huangshui river tributary was more than that of the main river. As Copepods and Cladoceras are sensitive to heavy metal pollution, a few species with strong pollution endurance were found. Rotifers were mainly α-β type. And ciliate ratio was low, just a few more in section Ⅱ and Ⅳ. The Shannon-Wiener, Simpson, Margalef and Pielou index were calculated, and all these indexes were less than 2. The biodiversity indexes were irrelevant to arsenic content (the correlation coefficient was 0.674), but rotifer density was significantly correlated with arsenic content (the correlation coefficient was 0.931). Zooplankton density was significantly associated with TN (the correlation coefficient was 0.826). Obviously, TN played a key role in zooplankton community composition. Arsenic content only affected rotifer biomass and could not decide the entire zooplankton community structure.

Key words: zooplankton; community characteristics; Xieshui River; arsenic